ChinaXiv合作期刊

煤炭清洁高效转化技术进展及发展趋势

卫小芳[1*]　王建国[1]　丁云杰[2]

1 中国科学院山西煤炭化学研究所　太原　030001
2 中国科学院大连化学物理研究所　大连　116023

chinaXiv:202303.10273v1

摘要　我国石油、天然气资源匮乏，煤炭储量相对丰富，在未来相当长时间内，煤炭在能源消费结构中仍将占主导地位。煤炭清洁高效利用是能源生产与消费革命的主要内容，而煤炭清洁高效转化是煤炭清洁高效利用的重要途径，对保障国家能源安全、经济社会可持续发展意义重大。文章分析了国内外煤炭清洁高效转化技术的研究现状，以及未来我国煤炭高效转化的布局、研究方向和发展趋势，以期为提高我国煤炭清洁高效转化水平、加快推进我国能源消费革命提供技术支撑。

关键词　煤炭，清洁，高效，转化

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2019.04.005

能源生产与消费革命的大趋势是能源的清洁高效利用，面对日益凸显的能源与环境问题，推动能源转型，实现能源清洁高效利用，成为我国能源发展的重要任务。我国是世界上唯一以煤为主的能源消费大国，在未来相当长的时期内，煤炭仍将在我国的能源结构中占主导地位[1]。据预测，2030年前我国能源消费需求仍将持续稳定增长，能源消费增量部分主要靠清洁能源提供，但煤炭年消费量仍将保持在35亿吨左右[2]。因此，煤炭清洁高效转化是打赢污染防治攻坚战和蓝天保卫战的重要支撑，是煤炭能源革命的重要内容。经过多年研究和技术开发，煤炭清洁高效转化技术已取得了一系列突破性进展[3]，成为我国煤炭行业持续健康发展的重要支撑。

1 开展煤炭清洁高效转化研究的意义

能源是社会与经济发展的物质基础，世界各国均高度重视能源安全，竭力发展能源技术、保障能源供给。虽然每个国家的资源储量不同，发展方向各有侧

*通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA21020000）
修改稿收到日期：2019年4月5日

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.10273v1

重，但能源清洁化是共同的发展趋势。

我国是世界上最大的能源消费国，2017 年能源消费总量达 44.9 亿吨标准煤，同比增长 2.9%，其中煤炭消费量占能源消费总量的 60.4%，同比下降 1.6%（图 1）[4]。戴彦德等[5]提出的重塑中国能源情景下，2050 年非化石能源将占比达 55%。世界能源理事会《世界能源远景：2050 年的能源构想》指出，到 2050 年，煤炭在一次能源消费中仍将发挥十分重要的作用。

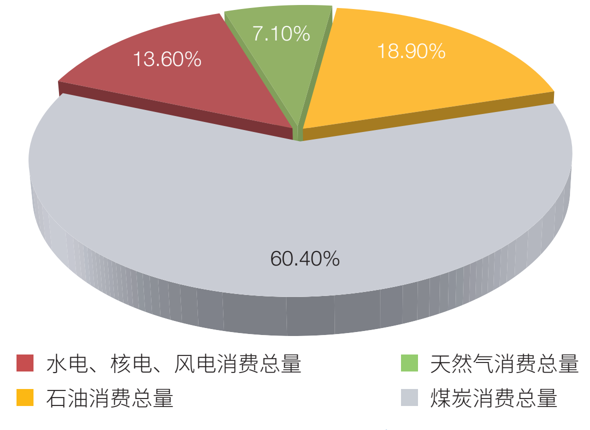


图 1　2017 年中国能源消费结构

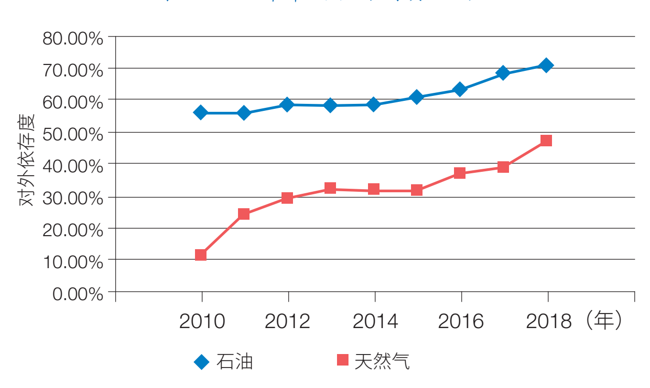


图 2　2010—2018 年中国石油、天然气的对外依存度

煤炭是我国重要的基础能源和化工原料，为国民经济发展和社会稳定提供了重要支撑。目前，煤炭的主要利用方式是直接燃烧发电和工业供热，总体上效率较低、污染较重，这不仅造成了巨大资源浪费，而且导致严重的环境污染和温室气体 CO_2 的大量排放。我国石油和天然气的探明可采储量仅为世界人均值的 10% 和 3%。2018 年我国石油净进口量 4.4 亿吨，同比增长 11%，对外依存度高达 69.8%；天然气进口量 1 254 亿立方米，同比增长 31.7%，对外依存度 45.3%（图 2）[6]。未来我国油气能源的高对外依存度态势仍将长期存在[7]。随着我国经济的快速发展，石油、天然气供应缺口逐年加大，势必影响我国经济的可持续发展，也将造成能源供给的安全隐患。煤炭清洁高效转化，不仅可以缓解我国能源供应紧张局面，保障国家能源安全，也是构建我国清洁低碳、安全高效的能源体系的必然选择。

习近平总书记在中央财经领导小组第六次会议上明确提出，要“大力推进煤炭清洁高效利用”；在十八届中共中央政治局第四十一次集体学习时的讲话中指出，要“推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系”。李克强总理在国家能源委员会会议上指出，“把推动煤炭清洁高效开发利用作为能源转型发展的立足点和首要任务”。国家发布一系列产业政策文件，如《能源技术创新“十三五”规划》《煤炭深加工产业示范“十三五”规划》《煤炭清洁高效利用行动计划（2015—2020 年）》《能源技术革命创新行动计划（2016—2030 年）》等，将煤炭高效清洁利用提升为我国当前能源发展的基本战略。科技部组织专家规划的“科技创新 2030—重大项目”更是明确将“推进煤炭高效清洁利用”作为主要任务。

2 国内外煤炭清洁高效转化研究概况

煤炭转化的发展主要受资源条件、石油价格变动、技术装备水平和政府政策等因素影响。煤炭清洁转化方面国外起步较早，西方发达国家和煤炭主要消费国一直在支持煤炭清洁转化及相关技术的研发，掌握了一系列核心技术。例如：1927 年，德国在莱那建成了世界第一套煤炭直接液化装置；1976 年，美国美孚公司开发成功甲醇生产汽油的 MTG 技术；1981 年，德国在北威州建成了煤处理量为 200 吨/天的大型 IGOR（Injection Gas-Oil Ratio）中试厂；

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.10273v1

1986年，日本三菱重工和科斯莫（COSMO）石油合作开发的由合成气经二甲醚两段合成油技术（AMSTG），建成了120千克/天的中间试验装置。虽然国外在煤炭转化利用的基础研究和关键技术研发方面具有一定优势，但总体上仍处于高端技术研发与储备阶段。由于各国能源结构不同，在煤炭清洁转化领域的研发和产业化方面投入力度不同，目前仅有南非和美国等少数国家开展了部分工程示范与商业运行。

近年来，我国在煤炭清洁转化方面的技术发展很快，取得了一系列重大成果。成功研发出2 000—3 000吨/天水煤浆和干煤粉气化技术并投入商业化运行，100万吨/年煤直接液化示范工程和400万吨/年煤间接液化示范工程建成并投产，10多套60万吨/年甲醇制烯烃工业装置投入商业化运行。在煤气化、煤液化、煤制烯烃等方面，我国总体上处于世界领先水平，但还需进一步降低水耗和能耗，实现产品的灵活调变；在煤热解及多联产、煤制天然气、煤制芳烃和含氧化合物等方面，需要进一步突破关键技术，形成成套工艺技术，开展工业示范。

3 煤炭清洁高效转化的主要技术

煤转化利用技术是用化学方法将煤炭转变为气体、液体和固体产品或半产品，而后进一步加工成能源和化工产品。目前，煤炭清洁高效转化利用方式主要分为：热解、气化、液化（直接液化和间接液化）等。现在发展的煤化工主要是以传统煤化工为基础，以煤炭的清洁利用和高效转化为目标的现代煤化工[8]。

3.1 煤热解技术

煤热解技术是将煤中富氢组分通过热解方式提取化工原料或优质液体燃料，以提高煤炭利用效率。20世纪70年代能源危机后，煤热解技术受到各国学者的广泛重视，并开发出多种热解新技术和新工艺，如美国食品机械公司（FMC）与煤炭研究办公室（OCR，Office of Coal Research）开发的COED热解工艺，以及日本煤炭能源中心与日本钢铁集团开发的煤炭快速热解技术等[9]。我国是世界上对煤热解技术研发最活跃、投入最多的国家，我国比较典型的煤热解技术见表1。现阶段以煤热解为基础的热电气多联产技术已展现出明显的节能降耗优势，应在条件适合地区以先示范后推广的原则，适度发展规模化、集成化的先导煤化工产业。对于煤热解技术存在的产品气固分离难、油气产率低或品质差、能量利用效率低、环境污染严重以及工业化程度不高等技术瓶颈，仍需相关企业、科研院所进行大量的研究。

3.2 煤气化技术

煤气化是煤炭高效、清洁利用的核心技术之一，

表1　中国典型煤热解技术

工艺技术	开发单位	项目名称	主要用途
褐煤热解新工艺	神华集团	神华集团6 000吨/年褐煤热解中试装置	热解提质
低阶煤转化提质技术	大唐华银电力公司、中国五环工程有限公司	新疆庆华煤炭分质综合利用多联产	热解多联产
固体热载体法低温热解技术	大连理工大学	呼伦贝尔东能实业500万吨/年褐煤低温热解项目	热解多联产
褐煤干燥成型及热解多联产技术	浙江大学等	华电呼伦贝尔2×600万吨/年褐煤热解多联产	干燥成型和热解多联产
煤拔头工艺	中国科学院山西煤炭化学研究所	陕西府谷建设的处理量为10吨/小时（中试）	热解提质
SJ-Ⅳ低温干馏炉工艺	神木三江煤化工公司	兴安盟辰龙能源集团200万吨/年洁净煤	干燥和低温干馏
多段回转炉热解技术	北京煤炭化学研究所	内蒙古海拉尔市5.5万吨/年示范	干燥和低温干馏

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.10273v1

是现代煤化工的龙头，无论是以生产油品为主的煤液化，还是以生产化工产品如合成氨、甲醇、烯烃等为主的煤化工，选择合适的煤气化技术都是整个生产工艺的关键。从20世纪80年代开始，我国陆续引进了多种煤气化技术，主要有德国鲁奇技术、美国德士古技术、荷兰壳牌技术、德国GSP技术等。但这些技术在本土化过程中存在运行不稳定、投资偏高以及对国内的煤种适应性差等缺点。近年来，结合我国的实际情况陆续开发出多种自主创新的煤气化技术（表2）。截至2017年底，具有自主知识产权的气化炉数共318台，气化能力37.7万吨/天，市场占有率总和高达51.6%[10]。我国自主创新的煤气化炉更适合我国国情和煤种，对我国煤化工的发展作出了巨大贡献。煤气化技术大型化、真正实现污水零排放、炉渣废固全部综合利用、水资源消耗量大幅降低等目标是煤气化技术研究的重点。

3.3 煤直接液化技术

煤直接加氢液化技术是煤与氢气在催化剂作用下通过加氢裂化，直接转化成液态油品。煤直接液化制油产品可以作为军民航空飞机、火箭以及装甲车辆的油品，满足我国日益增加的特种油品需求[11]。1973年后，因石油危机，西方各国相继开发出煤液化工艺，但仅处于实验室研究及中试开发阶段。神华集团自“十五”期间开始研发煤直接液化制备燃料技术，并于2010年建成投产了世界上第一座百万吨级的液化装置，成为煤直接液化产业化领跑者[12,13]，先后突破“煤直接液化核心工艺放大”“超大型设备制造和安装”“首套工业化示范装置的安全稳定长周期运行”三大世界性技术难题，并先后获得美国、日本、俄罗斯、澳大利亚、加拿大、乌克兰、印度、印度尼西亚等9个国家的专利授权[14]。目前该液化技术仍存在氢耗量大、产品轻质化、溶剂油不平衡和油品收率低等问题，有待通过长期的稳定运行来进一步优化提升。

3.4 煤间接液化技术

煤炭间接液化是首先将煤气化得到合成气，再利用一定的催化剂在合适的温度和压力之下，将得到的合成气转化为各类液体燃料和化学品的技术。南非沙索（Sasol）公司的煤间接液化技术是世界上最早的商业化技术；此外，长期以来，世界上其他石油化工公司也开展了大量的研究开发工作，典型的有荷兰壳牌公司的SMDS技术、美国美孚公司的MTG合成技术等。

目前，我国煤炭间接液化技术已进入商业化发展阶段，上海兖矿公司从2002年起开展煤炭间接液化技术的研发工作，成功开发了三相浆态床低温费托合

表2　中国自主创新煤气化技术

气化技术	开发单位	特点
四喷嘴水煤浆加压气化	华东理工大学	粗煤气中有效气（$CO+H_2$）最高可达84%，碳转化率可高达99%，比煤耗低
水煤浆加压气化	清华大学、北京达立科公司、山西阳煤丰喜肥业有限公司	煤种适应性广，粗煤气中有效气（$CO+H_2$）≥81%，碳转化率98%，比煤耗低
多元料浆加压气化	西北化工研究院	原料多样化，粗煤气中有效气（$CO+H_2$）最高可达83%，碳转化率96%—98%，比煤耗低
航天炉粉煤加压气化	航天长征化学工程股份有限公司	煤种适应性广，粗煤气中有效气（$CO+H_2$）≥90%，碳转化率99%，比氧耗低，比煤耗低
灰融聚流化床气化	中国科学院山西煤炭化学研究所	煤种适应性广，操作温度适中，稳定运行周期长，比氧耗低
二段炉粉煤加压气化	华能集团清洁能源技术研究院	粗煤气中有效气（$CO+H_2$）＞92%，碳转化率＞98.5%，比氧耗低，比煤耗低
神宁炉粉煤加压气化	神华宁夏煤业集团、中国五环工程有限公司等	粗煤气中有效气（$CO+H_2$）＞92%，碳转化率＞98.5%，比氧耗低，比煤耗低

chinaXiv:202303.10273v1

成和高温固定流化床费托合成技术。中科合成油技术有限公司研发了高温浆态床费托合成和油品加工成套技术，形成了“基础研究—工程化技术研发—工程设计与承包—催化剂生产—特种专用设备加工制造”的一体化技术研发和产业化支撑体系；采用中科合成油技术有限公司自主研发技术建成投产的世界单套规模最大的神华宁煤 400 万吨/年煤炭间接液化制油工业示范装置于 2016 年 12 月 21 日成功投产，2017 年 12 月 17 日全线实现满负荷稳定运行，标志着我国在能源战略技术储备方面迈出了实质性步伐。截至 2018 年底，我国已经建成 7 个煤炭间接液化项目，总产能达到 770 万吨/年（表 3），目前示范项目均实现了长周期的稳定运行。随着这些示范工程的成功运行，我国煤制油技术工艺得到了进一步的验证。

3.5 中国科学院煤炭清洁转化技术进展

煤炭清洁高效利用技术研发始终是中国科学院的优势战略方向。30 多年前，针对我国富煤贫油的能源结构，中国科学院战略部署了煤制油、煤制烯烃和煤制乙二醇等清洁转化利用技术。今天，自主研发的煤炭燃烧、煤制烯烃、煤制乙二醇和煤制油等清洁利用技术破茧而出，走在了国际前列。循环流化床燃烧技术得到了广泛应用；全球首套 60 万吨煤制烯烃装置运行稳定，煤制烯烃年产能达到 1 000 万吨；20 万吨煤制乙二醇工业示范技术日趋完善；煤制油技术 16 万—18 万吨示范装置稳定运行，各项技术指标国际领先，400 万吨/年合成制油项目达到全系统满负荷运行。

“十二五”期间，中国科学院在保持传统优势的基础上，集中 10 个研究所的优势力量，组织实施了战略性先导科技专项“低阶煤清洁高效梯级利用关键技术与示范”。专项研究提出了适合我国资源特征的高能效、低污染、低排放、高值化的低阶煤综合利用解决方案，形成了“热解—油气提质—燃烧—发电”“热解—气化—费托合成—油品共处理”和“热解—气化—合成液体燃料与化学品”3 条清洁高效梯级利用途径。通过专项的实施突破了热解、燃烧、气化、合成、 CO_2 利用等多项重大战略性关键技术，建成了若干重大示范转化工程，对加快新一代煤化工及清洁高效燃烧发电产业的发展，推动我国煤炭利用产业及区域经济的结构调整与升级，促进我国经济健康发展产生深远的影响。

4 煤炭清洁高效转化的重点方向

经过几十年的努力，我国已掌握了煤制油、煤制烯烃/芳烃、煤制乙二醇等现代煤化工技术，技术产业化也走在世界前列，各地相关开发的积极性也很高。但由于规划工作滞后、认识不一致、地方政府就地转化要求和企业的盲目投资也导致煤化工项目中存在一些问题。

表 3 我国煤制油产能统计

项目名称	企业	产能（万吨/年）	地点
伊泰鄂尔多斯16万吨间接煤制油	内蒙古伊泰煤制油有限责任公司	16	内蒙古鄂尔多斯
潞安山西长治16万吨间接煤制油	山西潞安煤基合成油有限公司	16	山西长治
神华鄂尔多斯18万吨间接煤制油	中国神华煤制油化工有限公司	18	内蒙古鄂尔多斯
兖矿榆林100万吨间接煤制油	陕西未来能源化工有限公司	100	陕西榆林
神华宁煤400万吨/年煤炭间接液化制油工业示范	神华宁夏煤业集团有限责任公司	400	宁夏宁东
内蒙古伊泰杭锦旗120万吨/年煤炭间接液化项目	内蒙古伊泰集团有限公司	120	内蒙古杭锦旗
山西潞安100万吨/年煤炭间接液化合成油项目	山西潞安矿业集团有限责任公司	100	山西长治

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.10273v1

就中长期规划而言，我国煤炭清洁高效转化利用主要围绕国家经济社会发展战略需求，针对我国煤炭开发利用中的关键科技瓶颈问题，通过理论创新、技术创新和管理创新，构建我国煤炭清洁高效可持续开发利用技术和管理体系，重点突破关键技术，开展工程示范验证，实现技术集成创新，大幅度提高我国煤炭开发利用自主创新水平和综合技术能力。到 2030 年，实现煤炭向科学开发方式转变，煤炭科学产能将由 55% 左右增加到 90% 以上，突破一批关键技术和重大装备，形成煤矿无害化开发和资源化利用技术体系，使我国成为煤炭开发国际标准制定者和技术主导者。

我国未来煤炭清洁高效转化利用研究重点是开展煤炭/合成气直接转化制燃料与化学品的反应和催化基础科学问题研究；煤制清洁燃气关键技术，煤制液体燃料及大宗化学品关键技术的研究等（图 3）。

4.1 煤转化制清洁燃料

4.1.1 煤气化及制天然气技术

研究适应我国典型煤种的大规模高效煤气化技术，开发高可靠性煤气显热回收技术及中温煤气除尘净化；研发不同产品目标的超临界煤气化、加氢煤气化、催化气化等新型煤气化技术。开发高效、低成本煤制天然气催化剂；开发短流程、低成本煤制天然气工艺；煤制天然气过程能量、质量集成优化技术，提高煤制天然气能量转化效率；降低生产能耗和水耗。

预期成果：突破适应我国典型煤种的大规模煤气化关键技术，实现长周期安全稳定运行，气化投资成本降低30%左右；突破大规模的煤制天然气工业化关键技术，形成具有自主知识产权的短流程清洁煤制天然气技术，能效显著提高；40 亿立方米级的煤制天然气工程可全部使用国产化技术和催化剂，催化剂成本大幅降低。

4.1.2 煤液化制油品

开发煤温和加氢和间接液化耦合新工艺及催化剂技术，开发液化油制取燃料、高值油品、含氧清洁燃料及化学品工艺技术，研究液化残渣制高端碳材料、沥青等综合利用技术，研究直接液化-费托合成一体化耦合技术并开展工程示范。

预期成果：完成百万吨级煤直接-间接液化耦合及联产特种油品及芳烃工业技术验证，系统能效 55% 以上，系统水耗降低 30%；完成百万吨级煤温和加氢液化工业技术验证。

4.2 煤制大宗化学品

4.2.1 煤转化制取含氧化合物技术

开展煤经合成气或者甲醇制含氧化合物研究，开

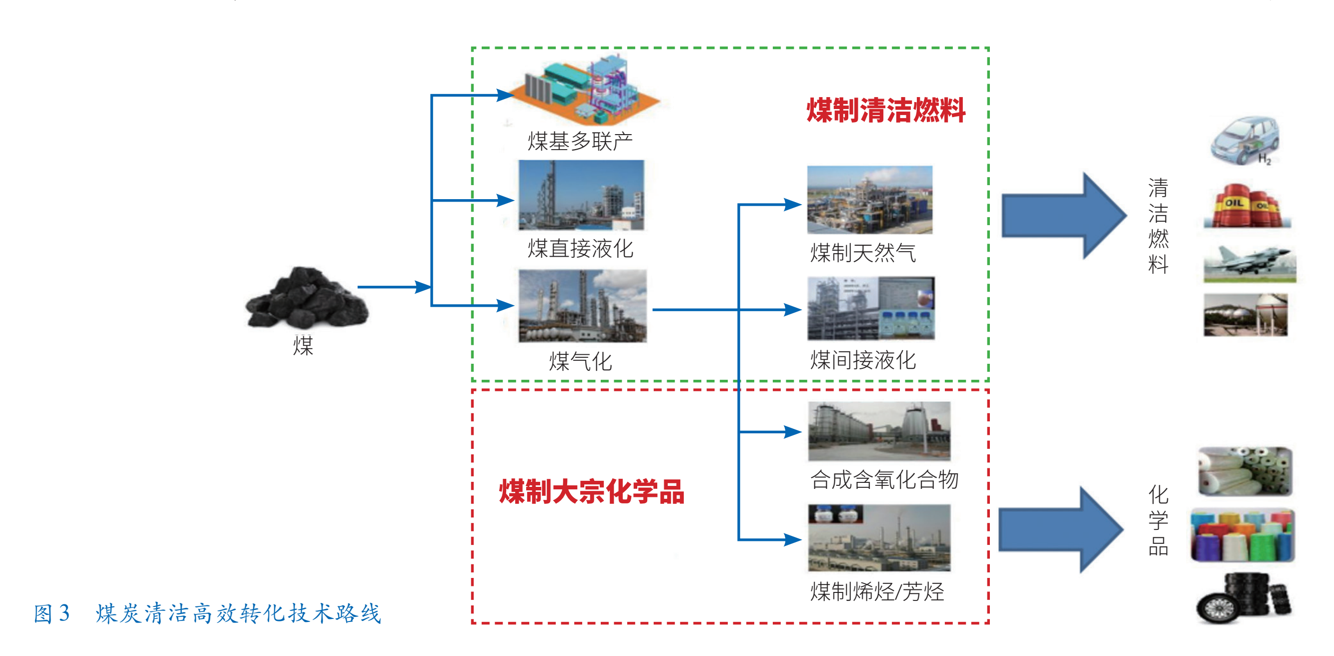


图 3　煤炭清洁高效转化技术路线

chinaXiv:202303.10273v1

发高活性高选择性催化剂及成套反应工艺；进行煤制乙二醇、乙醇和低碳混合醇等含氧清洁燃料/化学品成套技术开发。

预期成果：实现 50 万吨/年煤制乙二醇工业装置技术验证；完成煤制聚甲氧基二甲醚、合成气制低碳醇、煤制乙醇成套技术开发，开展百万吨级工业示范装置验证。形成合成气直接制乙醇等成套技术。

4.2.2 煤转化制取烯烃/芳烃技术

研究高效、高烯烃收率、乙烯丙烯灵活调控的甲醇制烯烃催化剂及工艺；研究甲醇制芳烃高性能催化剂、反应器及成套工艺技术。开发合成气直接制烯烃/芳烃复合高效催化剂。

预期成果：完成百万吨级甲醇制烯烃、甲醇制芳烃工业技术验证；形成合成气直接制烯烃/芳烃成套技术，其中合成气直接转化目标产物选择性达到 80% 以上，合成气综合能源效率显著提高。

5 总结及建议

能源是人类社会赖以生存和发展的物质基础，我国油气资源严重不足，原油和天然气对外依存度不断攀升、煤炭清洁高效转化利用势在必行，这种能源结构和现状决定了我国未来必须发展煤制油、煤制天然气、煤制烯烃、煤制芳烃、煤制乙二醇等现代煤化工技术。在坚持创新、坚持示范、坚持合作、科学发展的煤清洁高效转化原则基础上，本文提出 3 个方面具体建议。

（1）国家政策方面。政府应该明确发展的战略定位，加强煤炭清洁利用政策支持力度；通过优势科技资源整合，加强自主创新平台建设，建立“政产学研用”一体化的科技创新模式；加强基础研究和技术攻关，加大对关键共性技术的支持力度，促使企业真正成为技术创新、研发投入和成果转化的主体，促进有利于创新发展的市场环境形成。

（2）产业化方面。以绿色低碳为方向，着力推进重大技术研究和重大技术装备项目，切实把示范项目作为实现技术国产化、知识产权自主化和市场竞争力的标杆，带动产业升级。

（3）国际合作方面。积极响应国家“一带一路”倡议，努力争取“一带一路”周边国家和地区的优势资源，加强国际合作和关键技术开发力度，践行“引进来”与“走出去”相结合的战略，推进成果转化和技术输出，开拓国际市场。

参考文献

1 国家发改委. 煤炭工业发展“十二五”规划. [2012-03-28]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201203/W020140221371136734405.pdf.

2 徐博. 全球能源发展趋势与中国能源结构调整的现实选择. 煤炭经济研究, 2013, 33(10): 5-9.

3 国家能源局. 国家能源局关于印发《煤炭深加工产业示范“十三五”规划》的通知. [2017-02-08]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto83/201703/t20170303_2606.htm?keywords=.

4 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2017. 北京: 中国统计出版社, 2017.

5 戴彦德, 田智宇, 杨宏伟, 等. 重塑能源：中国——面向2050年能源消费和生产革命路线图（综合卷）. 北京: 中国科学技术出版社, 2017.

6 田磊, 付晓晴, 刘小丽, 等. 2017年我国石油市场形势政策分析与2018年展望. 中国能源, 2018, 40(1): 10-14.

7 BP. BP Energy Outlook 2019. [2019-04-01]. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf.

8 张俊凤. 关于提高工业废水可生化性的方法探讨. 山西科技, 2014, 29(3): 124-125.

9 高建辉. 国内外型焦生产工艺与发展前景. 煤化工, 2004, 32(4): 8-12.

10 汪寿建. 现代煤化工技术进展趋势及应用综述. 化工进展,

ChinaXiv合作期刊

2016, 35(3): 653-664.

11 李寿生. 现代煤化工要从四方面求新突破.中国能源报, 2017-10-09.

12 张玉卓. 中国神华煤直接液化技术新进展. 中国科技能源: 2006, 2: 32-35.

13 张玉卓. 神华煤制燃料和合成材料技术探索与工程实践. 煤洁净转化工程. 北京: 煤炭工业出版社, 2011 .

14 朱和, 金云. 认清新形势 适应新常态促进新发展转型中的中国炼油工业及"十三五"发展思考. 中国石油和化工经济分析, 2015, (5): 14-19.

Progress and Development Trend of Clean and Efficient Coal Utilization Technology

WEI Xiaofang[1*] WANG Jianguo[1] DING Yunjie[2]

(1 Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, China;

2 Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

Abstract China is short of oil and natural gas resources and relatively rich in coal reserves. For a long time to come, coal will be still at the dominant position in the energy consumption structure in China. Clean and efficient utilization of coal is the main content of energy production and consumption revolution. It not only is an important way of clean and efficient utilization of coal, but also has a great significance to national energy security, sustainable economic and social development. The article analyzes the research status of coal clean and efficient conversion related technologies worldwide, as well as the layout of China's efficient coal conversion, the research direction, and the development trend, in order to technologically support the improvement of clean and efficient conversion level of coal and the acceleration of energy consumption revolution in China.

Keywords coal, clean, high-efficiency, conversion



卫小芳 中国科学院山西煤炭化学研究所副研究员。在国内外核心期刊上发表论文 7 篇，其中 SCI 论文 2 篇，EI 论文 3 篇。主要参与企业合作项目"甲醇转化制芳烃、甲醇转化制汽油反应工艺中间试验及工业示范试验"，2011 年迄今主要从事"低阶煤清洁高效梯级利用关键技术与示范"战略性先导科技专项的管理工作。

E-mail: weixf@sxicc.ac.cn

WEI Xiaofang Associate Researcher of Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences (CAS). In 2011, she moved to the special management office of Institute of Coal Chemicals, mainly engaged in the management of the Strategic Priority Program of CAS "Demonstration of Key Technologies for Clean and Efficient Utilization of Low-rank Coal". She has published 7 papers in core journals, with 2 of them are indexed by SCI and 3 of them are indexed by EI. E-mail: weixf@sxicc.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author

chinaXiv:202303.10273v1

chinaXiv:202303.10273v1

参考文献（双语版）

1 国家发展改革委. 煤炭工业发展“十二五”规划. [2012-03-28]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201203/W020190905497681300911.pdf.

National Development and Reform Commission. 12th Five-Year Plan of coal industry development. [2012-03-28]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201203/W020190905497681300911.pdf. (in Chinese)

2 徐博. 全球能源发展趋势与中国能源结构调整的现实选择. 煤炭经济研究, 2013, 33(10): 5-9.

Xu B. Global energy development tendency and realistic choice of China energy structure adjustment. Coal Economic Research, 2013, 33(10): 5-9. (in Chinese)

3 国家能源局. 国家能源局关于印发《煤炭深加工产业示范“十三五”规划》的通知. [2017-02-08]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto83/201703/t20170303_2606.htm?keywords=.

National Energy Administration. Notice of National Energy Administration on printing and distributing the *13th Five-Year Plan of coal deep processing industry demonstration*. [2017-02-08]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto83/201703/t20170303_2606.htm?keywords=. (in Chinese)

4 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2017. 北京: 中国统计出版社, 2017.

National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2017. Beijing: China Statistics Press, 2017. (in Chinese)

5 戴彦德, 田智宇, 杨宏伟, 等. 重塑能源：中国——面向2050年能源消费和生产革命路线图（综合卷）. 北京: 中国科学技术出版社, 2017.

Dai Y D, Tian Z Y, Yang H W, et al. Reinventing Fire: China—A Roadmap for Energy Consumption and Production Revolution in 2050 (Comprehensive Volume). Beijing: China Science and Technology Press, 2017. (in Chinese)

6 田磊, 付晓晴, 刘小丽, 等. 2017年我国石油市场形势政策分析与2018年展望. 中国能源, 2018, 40(1): 10-14.

Tian L, Fu X Q, Liu X L, et al. Analysis and prospect of oil market and policy. Energy of China, 2018, 40(1): 10-14. (in Chinese)

7 BP. BP Energy Outlook 2019. [2019-04-01]. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf.

8 张俊凤. 关于提高工业废水可生化性的方法探讨. 山西科技, 2014, 29(3): 124-125.

Zhang J F. Probe into the methods for improving the biodegradability of industrial wastewater. Shanxi Science and Technology, 2014, 29(3): 124-125. (in Chinese)

9 高建辉. 国内外型焦生产工艺及发展前景. 煤化工, 2004, 32(4): 8-12.

Gao J H. Briquette coke production process home and abroad and its prospect. Coal Chemical Industry, 2004, 32(4): 8-12. (in Chinese)

10 汪寿建. 现代煤气化技术发展趋势及应用综述. 化工进展, 2016, 35(3): 653-664.

Wang S J. Development and applicatin of modern coal gasification technology. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(3): 653-664. (in Chinese)

11 李寿生. 现代煤化工要从四方面求新突破.中国能源报, 2017-10-09.

Li S S. Modern coal chemical industry should seek new breakthroughs from four aspects. China Energy News, 2017-10-09. (in Chinese)

12 张玉卓. 中国神华煤直接液化技术新进展. 中国科技产业, 2006, (2): 32-35.

Zhang Y Z. New progress of ShenHua direct coal liquefaction technologyin China. Science & Technology Industry of China, 2006, (2): 32-35. (in Chinese)

ChinaXiv合作期刊

13 张玉卓. 煤洁净转化工程:神华煤制燃料和合成材料技术探索与工程实践. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.
Zhang Y Z. Clean Coal Conversion Technology: Technology Exploration and Engineering Practice of Shenhua Coal Gas and Composites. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011. (in Chinese)

14 朱和, 金云. 认清新形势 适应新常态促进新发展转型中的中国炼油工业及“十三五”发展思考. 中国石油和化工经济分析, 2015, (5): 14-19.
Zhu H, Jin Y. Recognize the new situation, adapt to the new normal in order to promote development of China’s refining industry and the the 13th Five-Year Plan in the new development and transformation. China Petrochemical Economic Analysis, 2015, (5): 14-19. (in Chinese)

chinaXiv:202303.10273v1